

Amélioration de la sensibilité du Kurtosis en utilisant le débruitage par ondelettes

M. MERZOUG^a, A. MILOUDI^b

a. Laboratoire de Mécanique Avancée, USTHB, Algérie,
moustapha_merzoug@yahoo.fr

b. Laboratoire de Mécanique Avancée, USTHB, Algérie,
amiloudi@yahoo.fr

Résumé :

Le but de cet article est de montrer l'intérêt de la transformée en ondelettes dans l'amélioration de la sensibilité des indicateurs scalaires (Kurtosis) dans le cadre de la maintenance conditionnelle par analyse vibratoire des transmissions à engrenages. Lorsque l'engrenage est endommagé, l'apparition d'une fissure sur la dent d'engrenage vient perturber le signal. Cette modification est due à la présence d'impulsions périodiques. Néanmoins, la présence de bruit de fond induite par l'excitation aléatoire peut avoir une influence sur les valeurs de ces indicateurs temporels. Le débruitage de ces signaux par transformée en ondelettes permet d'améliorer la sensibilité de ces indicateurs et d'augmenter la fiabilité du diagnostic. Pour simuler le signal à analyser, nous avons introduit volontairement un défaut de fissure de la dent d'engrenage. Nous avons retenu des ondelettes du type Daubechies qui s'apprêtent bien à ce type de problème. Le but est essayer de maîtriser les différents paramètres liés à l'analyse par ondelettes pour une détection fiable et peu coûteuse, à savoir, l'ordre de l'ondelette et le niveau de décomposition. L'approche, consiste à observer le kurtosis pour plusieurs ordres d'ondelette en fonction de la gravité du défaut.

Abstract :

The purpose of this article is to show the effectiveness of the wavelet transform in improving the sensitivity of scalar indicators(kurtosis) in condition monitoring by vibration analysis of gear transmissions. When the gear is damaged, the appearance of a crack on the gear tooth disturbs the signal by the presence of periodic pulses. Nevertheless, the presence of background noise induced by random excitation may influence the values of these temporal indicators. Denoising of these signals by wavelet transform improves the sensitivity of these indicators and increase diagnostic reliability. To simulate the signal to be analyzed, we voluntarily introduced a crack defect on the gear tooth. We have Daubechies wavelets type, which are well suited to this problem type. The goal is to try to control the various parameters related to the wavelet analysis for

reliable and inexpensive detection, i.e., the wavelet order and the decomposition level. The approach consists in observing the kurtosis for several wavelet orders according to the severity of the defect.

Mots clefs : Engrenages, Indicateurs scalaires, Ondelettes, Débruitage

1 Introduction

De tous temps les engrenages étaient sources d'inquiétudes pour les ingénieurs. Ces éléments très fiables, sont souvent une cause d'une panne majeure entraînant l'arrêt de la production, voire des incidents de fonctionnement très graves. Ecaillage, jeu entre dent et détérioration des dents sont des défauts souvent difficilement détectables dans le premier stade de leur apparition. Ces dernières années beaucoup de chercheurs se sont penchés sur l'utilisation de nouvelles méthodes et techniques pouvant offrir à la fois une détection précoce et un diagnostic fiable. La méthode d'enveloppe, la méthode de moyennage synchrone ont largement succédé à l'analyse spectrale, qui d'ailleurs présentait d'importantes limites de détection. Le développement de la distribution temps-fréquence a permis la mise en place de plusieurs techniques fiables telles que la transformée de Fourier à court terme, la distribution de Wigner-ville et la transformée en ondelettes. Cette dernière, offrant un compromis entre résolution temporelle et fréquentielle, est la plus récente. Plusieurs applications de la transformée en ondelettes pour la détection des défauts ont été proposées, utilisant la transformée en ondelettes continue [1], [2], [3], [4], discrète [5], [6] et l'analyse par paquet d'ondelettes [7]. Une synthèse intéressante est très bien présentée dans [8]. Donoho [9] est le premier à établir une méthode de débruitage basée sur la transformée en ondelettes. Dans [10], une méthode basée sur l'ondelette de Morlet a été testée avec succès sur les engrenages et les roulements, elle permet un débruitage bien meilleur que celui de Donoho.

Djebala et al [11] ont proposé une approche qui profite du caractère local de l'analyse en ondelettes et sa capacité à détecter les phénomènes transitoires. Ils ont tout d'abord calculé la transformée de Hilbert du signal puis ils ont calculé une enveloppe du signal qui sera traitée par l'analyse en ondelettes. Ils ont extrait alors le détail qui couvre la fréquence de rotation de la roue défectueuse. Parey et al [12] utilisent une décomposition en mode empirique (EMD) utilisée comme un outil de traitement pour des signaux non stationnaires. Dans leur travail, ils exposent son fonctionnement à partir d'un signal réel. Ils exploitent cette méthode pour détecter d'une manière précoce la présence d'un défaut en utilisant des indicateurs vibratoires globaux qui sont basés sur l'analyse statistique d'un signal temporel tels que le Kurtosis et le facteur crête. Les indicateurs sont parfois limités et ne peuvent donner un verdict fiable sur l'état de l'engrenage. Bruit aléatoire et d'autres composantes de la machine viennent polluer le signal et rendent la détection difficile, voire impossible dans certains cas. Une première solution consiste à mesurer les signaux dans des bandes étroites aux hautes fréquences grâce à un filtrage

passer-bande [13]. Une deuxième approche consiste à utiliser les outils modernes de débruitage des signaux vibratoires développés à partir de la transformée en ondelettes [14], soustraction spectrale [15], ou le filtrage adaptatif [16]. Une comparaison entre les trois méthodes a été appliquée sur des signaux de roulements défectueux [17]. En effet, l'utilisation de ces méthodes permet d'avoir des signaux filtrés et débruités dont le Kurtosis est plus significatif. Ceci va permettre de détecter les éventuels défauts dont la détection n'était pas possible dans les signaux bruts. L'objectif de ce travail est de proposer une méthode basée sur l'optimisation de l'analyse multirésolution en ondelettes. Adaptée à la détection des défauts induisant des chocs, elle permet l'amélioration de la sensibilité du Kurtosis.

2 Réponse dynamique de la transmission

2.1 Modèle dynamique retenu

Le modèle dynamique utilisé est accessible dans la littérature et la représentation graphique correspondante est présentée sur la Figure 1.

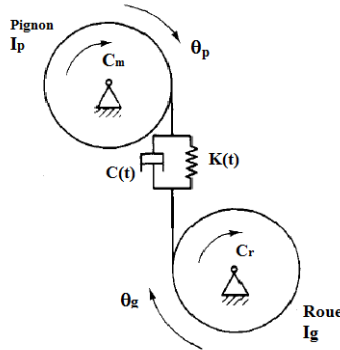


Figure 1: Modèle dynamique retenu

L'équation du mouvement est réorganisée sous la forme de l'équation (1). La réponse dynamique est simulée en résolvant numériquement cette équation pour chaque incrément de temps. L'effet de la variation de la raideur d'engrènement est implanté dans le modèle par la mise à jour de sa valeur pour chaque incrément de temps.

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + C(t) \frac{dx}{dt} + K(t)x = F \quad (1)$$

Où la variable x est le degré de liberté analysé, appelé erreur de transmission dynamique, elle est définie comme suit:

$$x = R_p \theta_p - R_g \theta_g \quad (2)$$

Où R_p et R_g sont les rayons de base, θ_p et θ_g les rotations, respectivement, du pignon et de la roue. Le terme de la raideur $K(t)$ est mathématiquement traité au moyen d'un développement de Fourier, grâce à un facteur constant K_m , F est la force de contact entre les dents.

La force est calculée comme le rapport entre le couple C_m et le rayon de base R_p :

$$F = \frac{C_m}{R_p} = \frac{C_r}{R_g} \quad (3)$$

C_m et C_r sont les couples moteur et récepteur.

Le deuxième paramètre à évaluer est la masse équivalente M . C'est une fonction des moments d'inertie des deux roues de l'engrenage I_p et I_g et des rayons de base correspondants R_p et R_g :

$$M = \frac{I_p I_g}{I_g R_p^2 + I_p R_g^2} \quad (4)$$

2.2 Effet de la variation de la raideur d'engrènement

Lin et Parker [18] supposent que la raideur varie avec la rotation de l'arbre, suivant l'équation:

$$K(t) = K_m + 2K_a \sum_{i=1}^{\infty} a_i \sin(\omega_m t) + b_i \cos(\omega_m t) \quad (5)$$

Où

$$a_i = -\frac{2}{i\pi} \sin[i\pi(\epsilon - 2\phi)] \sin(i\pi\epsilon) \quad (6)$$

$$b_i = -\frac{2}{i\pi} \cos[i\pi(\epsilon - 2\phi)] \sin(i\pi\epsilon) \quad (7)$$

Où,

- K_m : raideur d'engrènement moyenne
- $2K_a$: taux de variation de la raideur
- ω_m : fréquence d'engrènement
- ϵ : facteur de conduite
- ϕ : angle de phase

La fissuration d'une dent d'engrenage est un défaut qui présente des aspects dangereux pour le fonctionnement correct. Pouvoir détecter ce défaut le plutôt possible s'avère donc une tâche d'une extrême importance.

Pour modéliser une fissure d'une dent au niveau de sa racine, la pluparts des études considèrent des modifications dans le profil de la raideur d'engrènement [19]. En effet la raideur s'atténue au niveau de la dent défaillante, et cela se produit une fois par cycle de contact de cette dent.

Nous avons donc modélisé une fissure locale sur une dent par rapport à sa position angulaire sur le cercle de base. A cette position, on considère une diminution de

la raideur d'engrènement, ce phénomène se répète à chaque fois que la dent fissurée rentre en contact avec les dents de la roue opposée. Dans ce cas la condition qui régit l'expression de la raideur en présence d'une fissure localisée sur une dent s'écrit comme suit :

- Si le contact se fait entre des dents saines, la raideur d'engrènement est donnée par $K(t)$,
- Si le contact se fait entre la dent fissurée et les dents de la roue opposée, la raideur d'engrènement est donnée par $K(t) [1 - D(t)]$, avec $0 < D(t) < 1$ qui présente le taux de dégradation de la raideur.

Cela revient à supposer que la raideur d'engrènement en présence d'une fissure localisée sur une dent, comme une fonction modulée par une fonction périodique $D(t)$, qui a pour expression :

$$D(t) = \alpha \delta \left[1 + \sum_n \frac{\sin(n\alpha\pi)}{n\alpha\pi} \cos(n\Omega_i t) \right] \quad (8)$$

$\Omega_i = 2\pi f_i$, $i = 1, 2$ et f_i représente la fréquence de rotation de la roue affectée par la fissure. δ est l'amplitude de la fonction $D(t)$, il représente l'évolution de la fissure.

$\alpha = \frac{1}{Z_i}$ représente le rapport cyclique.

2.3 Signaux de simulations

Le défaut envisagé sur l'engrenage est un défaut localisé sur une dent de la roue motrice de l'engrenage. La Figure 2 présente l'allure du signal simulé. Les signaux temporels sont présentés pour une durée de 0.3 secondes.

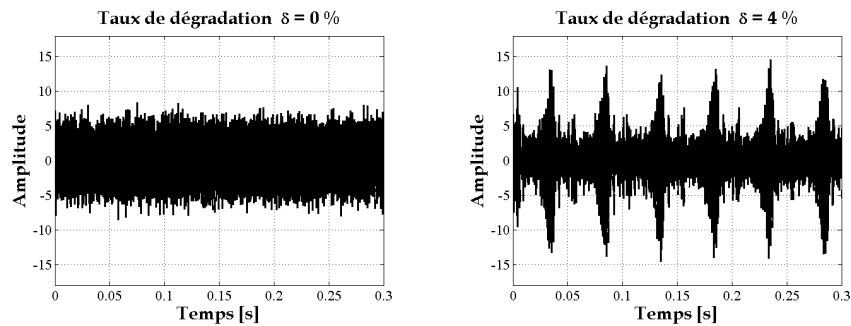


Figure 2: Signaux simulés bruités avec et sans défaut

Le signal d'accélération avec un engrenage sans défaut est constitué de deux caractéristiques principales : il contient un signal périodique à la période d'engrènement et une modulation d'amplitude de période de rotation d'arbre. En présence du défaut

local d'engrenage, l'amplitude générale du signal due à la modulation d'amplitude est également plus importante que dans la configuration sans défaut.

2.4 Évolution du Kurtosis pour les signaux simulés bruités

Dans plusieurs travaux le kurtosis s'est montré plus sensible que les autres indicateurs scalaires, ce qui le place en tant qu'indicateur privilégié lorsqu'il s'agit de défauts de type chocs, notamment ceux des roulements et des engrenages [13].

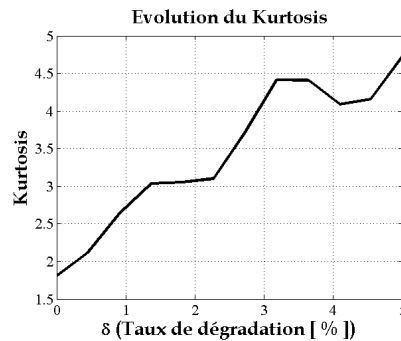


Figure 3: Évolution du Kurtosis - Signal simulé bruité

La Figure 3, représente l'évolution selon la gravité du défaut, du Kurtosis pour le signal simulé bruité où la totalité des points sont pris en compte. Les résultats obtenus montrent qu'il est difficile de détecter le défaut dès sa naissance (pour un seuil fixé au paravant). une analyse de cet indicateur met en évidence que le défaut n'apparaît que lorsque le taux de dégradation atteint la valeur de 3.18 %. Il est donc nécessaire de décomposer le signal en plusieurs approximations en utilisant l'analyse en ondelettes.

3 Optimisation de l'analyse multirésolution

Le débruitage est un processus qui consiste à éliminer le bruit d'un signal quelconque. Depuis plusieurs décennies, on tente de développer des méthodes de plus en plus performantes et rigoureuses en matière d'élimination de bruit tout en préservant l'intégrité du signal. Longtemps le domaine de Fourier était l'outil de choix pour traiter ce problème, sauf qu'il était toujours difficile d'éviter d'altérer du signal en réduisant une grande quantité de bruit. Des méthodes basées sur le seuillage par transformée d'ondelettes ont vu le jour pour combler ces lacunes [9], [20], [21]. Leur force réside dans leur simplicité d'application et dans leur efficacité. L'algorithme de base de débruitage par ondelettes peut être décomposé en trois étapes essentielles [9] :

A partir du signal à débruiter, on décompose le signal sur une base orthogonale d'ondelettes. On effectue ensuite une opération de seuillage qui consiste à éliminer les coefficients qu'on considère comme du bruit ou à les réduire en fonction du seuil calculé.

En dernier lieu, on applique la transformée en ondelettes inverse sur les coefficients seuillés et on récupère le signal débruité.

Les méthodes de seuillage les plus connues, introduites par Donoho [20], sont le seuillage doux et le seuillage dur. Des variantes de ces types de seuillage [22] ont été développées pour tenter d'améliorer ces méthodes.

3.1 Seuillage doux

Le seuillage doux consiste à éliminer tout coefficient au dessous du seuil et à soustraire ce seuil des autres coefficients. Soit un vecteur x quelconque. La fonction de seuillage doux $T_{doux}(x)$ appliquée sur x est donnée par :

$$T_{doux}(x) = \begin{cases} \text{sign}(x)(|x| - \lambda) & |x| \geq \lambda \\ 0 & |x| < \lambda \end{cases} \quad (9)$$

3.2 Seuillage dur

Le seuillage dur est plus catégorique que le seuillage doux du fait qu'on considère un coefficient donné soit comme représentant totalement un bruit pur donc à éliminer, ou comme un coefficient représentant une portion du signal donc à conserver. La fonction de seuillage dur $T_{dur}(x)$ appliquée sur x est donnée par l'équation :

$$T_{dur}(x) = \begin{cases} x & |x| < \lambda \\ 0 & |x| \geq \lambda \end{cases} \quad (10)$$

Où λ est la valeur du seuil.

Le théorème de Donoho et Johnstone définit un seuil T pour les coefficients de la transformée en ondelettes [20] et dont la valeur est:

$$T = \sigma \sqrt{2 \log(N)} \quad (11)$$

Où σ est l'écart-type ou le niveau du bruit qui est estimé par l'équation (12) :

$$\sigma = \frac{\text{median}(|d_i|)}{0.6745} \quad (12)$$

et où d_i représente les coefficients des détails obtenus au niveau i .

3.3 Choix de l'ondelette analysante

L'analyse du choix de l'ondelette analysante sera effectuée sur la base d'un test de plusieurs ondelettes analysantes. Ceci se fera sur l'étude du SNR, existant entre le signal original et le signal après reconstruction. L'ondelette analysante choisie sera celle qui présentera la valeur du SNR la plus grande. Nous appliquons l'algorithme d'analyse

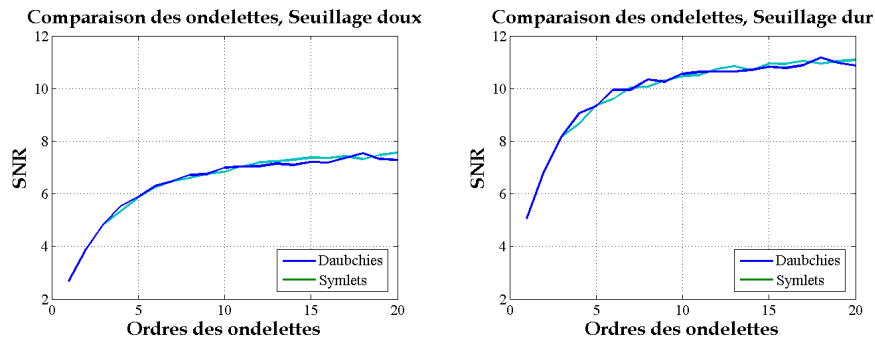


Figure 4: Comparaison entre ondelettes

multirésolution de Mallat en employant l'ondelette analysante pour différents ordres. Les ondelettes analysantes les plus utilisées sont Daubechies (db) et Symelet (sym). Une comparaison entre deux ondelettes est montrée sur la Figure 4.

Dans le cadre des simulations effectuées dans ce travail, les choix ont été effectués à plusieurs niveaux concernant : le type d'ondelette, le nombre de niveaux de décomposition et la technique de seuillage.

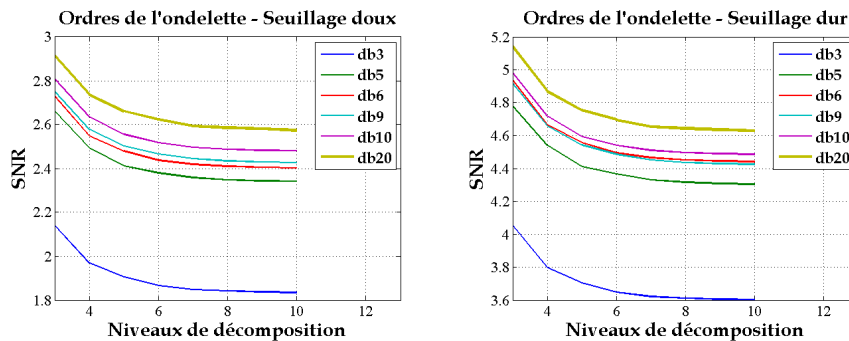


Figure 5: Comparaison entre ordres d'ondelette

L'étude relative au choix de l'ordre de l'ondelette de Daubechies, montre que la (db20) est la mieux adaptée pour ce type de signaux dans le cas d'un seuillage doux.

Les résultats sont donnés pour le niveau 6 et la méthode parmi les méthodes de seuillage (seuillage doux, seuillage dur), nous tracons les courbes représentant le gain en rapport signal/bruit en fonction du SNR en entrée et de l'ordre de l'ondelette.

Le seuillage doux donne des résultats peu intéressants dans la mesure où il altère énormément le signal ce qui est bien visible dans le cas d'un SNR égal à -5, 0 ou à 5 dB et où l'on observe un gain négatif, d'où son inefficacité. Pour ce qui concerne la variation de l'ordre de l'ondelette, on constate qu'il n'a presque aucun effet sur l'efficacité de débruitage pour les valeurs de SNR -5 dB et 0 dB, mais qu'il donne une amélioration

entre les valeurs de 1^{er} ordre de l'ondelette (ordre 5 et 40) dans le cas où le SNR est fixé à 5 ou à 10 dB. On constate dès lors que plus l'ordre est élevé, plus cette amélioration est remarquable. Le seuillage dur représente une amélioration très nette par rapport au seuillage doux. Bien que cette amélioration ne soit pas très efficace pour un SNR = -5dB, elle l'est fortement pour un SNR = 0 dB et plus où l'on observe un gain de plusieurs décibels comme le montre la Figure 6.

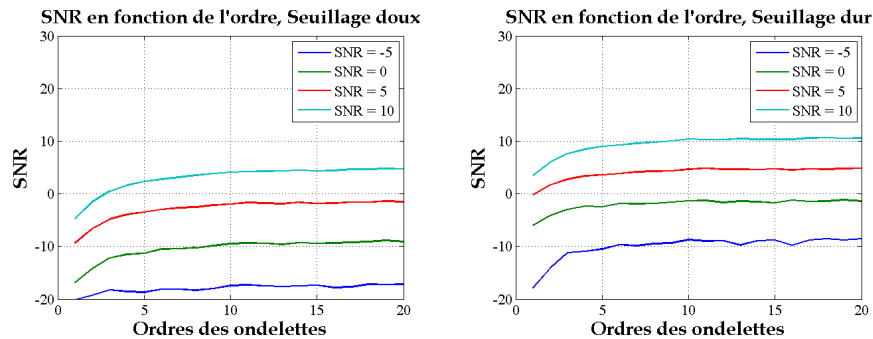


Figure 6: Comparaison entre ordres de l'ondelette

4 Évolution du Kurtosis pour différentes approximations

Plusieurs simulations ont montré que l'indicateur le mieux adapté dans ce cas est le Kurtosis puisque c'est lui qui peut détecter d'une manière précoce le défaut pour les premières approximations. Effectivement la Figure 7; met en évidence cette conclusion. Au bout de l'approximation 2, nous pouvons détecter le défaut lorsque le taux de dégradation atteint la valeur de 1.36 % si on se fixe un seuil de 3 pour le Kurtosis.

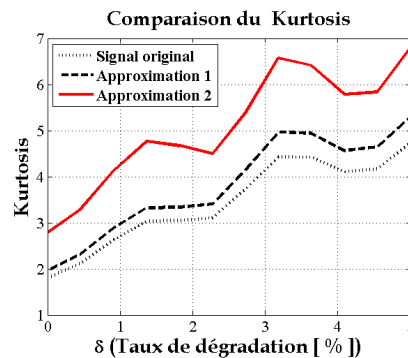


Figure 7: Comparaison des Kurtosis des signaux simulés avec les approximations

Une comparaison entre les valeurs du Kurtosis avant décomposition du signal et après, montre l'apport des transformées en ondelettes dans l'amélioration de la sensibilité de cet indicateur par rapport au cas classique.

Les valeurs du Kurtosis sont très influencées par le bruit. La Figure 8, montre la différence entre les valeurs du Kurtosis du signal original et celles du signal reconstruit.

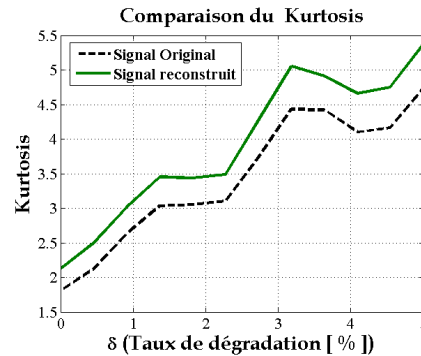


Figure 8: Comparaison des Kurtosis

5 Conclusion

Dans ce travail, nous avons présenté une approche optimisée sur le débruitage des signaux issus d'une modélisation dynamique d'une transmission par engrenages en utilisant la transformée en ondelettes. Trois éléments essentiels ont été considérés, le choix du type et ordre d'ondelettes et enfin la méthode de seuillage à utiliser. Pour le choix du type d'ondelettes, il fallait trouver une ondelette qui soit bien adaptée au débruitage des signaux, ce qui n'est tout à fait pas évident. Nous avons procédé à quelques essais avec plusieurs types. L'ondelette de Daubechies s'est avérée intéressante dans notre cas. La encore il fallait décider de l'ordre à choisir, d'où la nécessité de faire entrer ce paramètre dans nos tests d'essai. Les résultats de l'approche utilisée sont satisfaisants dans la mesure où elle améliore la sensibilité du Kurtosis dans le cadre de la maintenance conditionnelle par analyse vibratoire des transmissions à engrenages.

References

- [1] A. Djebala, N. Ouelaa, N. Hamzaoui, S. Guenfoud, *Détection précoce des défauts de roulements par analyse multirésolution en ondelettes*. First International Congress Design and Modeling of Mechanical Systems, Tunisia, 2005.

- [2] W.J. Wang, P.D. MacFadden, *Application of wavelets to gearbox vibration signals for fault detection*. Journal of Sound and Vibration 192, 1996, pp. 927–939.
- [3] H. Zheng, Z. Li, X. Chen, *Gear faults diagnosis based on continuous wavelet transform*. Mechanical Systems and Signal Processing 16 2002, pp. 447–457.
- [4] R. Rubini, U. Meneghetti, *Application of the envelope and wavelet transform analyses for the diagnosis of incipient faults in ball bearings*. Mechanical Systems and Signal Processing 15, 2001, pp. 287–302.
- [5] K. Chinmaya, A.R. Mohanty, *Monitoring gear vibrations through motor current signature analysis and wavelet transform*. Mechanical Systems and Signal Processing 20, 2006, pp. 158-187.
- [6] C. K. Sung, H. M. Tai, C.WChen, *Locating defects of gear system by the technique of wavelet transform*. Mechanism and Machine Theory 35, 2000, pp. 1169-1182.
- [7] N.G. Nikolaou, I.A. Antoniadis, *Rolling element bearing fault diagnosis using wavelet packets*. NDT & E Int 35, 2002, pp. 197-205.
- [8] E. Ericsson, N. Grip, E. Johansson, L. Persson, E. R. Sjoberg, J. O. Stronberg, *Toowards automatic detection of local bearing defects in rotating machines*. Mechanical Systems and Signal Processing 19, 2005, pp. 509-535.
- [9] D.L. Donoho, *De-noising by soft thresholding*. IEEE Trans. Information Theory 41, 1995, pp. 613-627.
- [10] L. Y. Jing, *Feature extraction based on Morlet wavelet and its application for chanical fault diagnosis*. Journal of Sound and Vibration. 234, 2000, pp. 35-148.
- [11] A. Djebala, N. Ouelaa, T. Kebabsa, Y. Ramdane, M. K. Babouri, *Détection des défauts non stationnaires de dentures d'engrenages par application de l'analyse en ondelettes et la transformée de Hilbert*. Congrès Algérien de Mécanique Algérie, 2013.
- [12] A. Parey, M. El Badaoui, F. Guillet, N. Tandon, *Dynamic modelling of spur gear pair and application of empirical mode decomposition-based statistical analysis for early detection of localized tooth defect*. Journal of Sound and Vibration 294, 2006, pp. 547-561.
- [13] C. Pachaud, *Crest factor and kurtosis contributions to identify defects inducing periodical impulsive forces*. Mechanical Systems and Signal Processing 11, 1997, pp. 903-916.
- [14] J. Ling, L. Qu, *Feature extraction based on morlet wavelet and its application for mechanical fault diagnosis*. Journal of Sound and Vibration 234, 2000, pp. 135-148.

- [15] J. P. Dron, F. Bolaers, L. Rasolofondraibe, *Improvement of the sensibility of scalars indicators thanks to de-noising method by spectrale subtraction. Application to the detection ball bearing defects*. Journal of Sound and Vibration 270, 2004, pp. 61-73.
- [16] J. Lin, M. J. Zuo, *Gearbox fault diagnosis using adaptive wavelet lter*. Mechanical Systems and Signal Processing 17, 2003, pp. 1259-1269.
- [17] J. P. Dron, F. Bolaers, L. Rasolofondraibe, X. Chimentin, *A comparative experimental study on the use of three denoising methods for bearing defect detection*. Meccanica 45, 2010, pp. 265-277.
- [18] J. Lin, R. G. Parker, *Mesh stiffness variation instabilities in two stage gear system*. Journal of Vibration and Acoustics 124, 2002, pp. 68-76.
- [19] M.S. Abbes, M. Trigui, F. Chaari, T. Fakhfakh, M. Haddar, *Dynamic behaviour modelling of a exible gear system by the elastic foundation theory in presence of defects*. European Journal of Mechanics - A/Solids, 29, 2010, pp. 887-896.
- [20] D.L. Donoho, I. M. Johnstone, *Ideal spatial adaptation by wavelet*. Shrinkage Biometrika, vol. 81, 1994, pp. 425-455.
- [21] I. M. Johnstone, B.W. Silverman, *Wavelet threshold estimators for data with correlated noise*. J. Roy. Statist. Soc. B 59, 1997, pp. 319-351.
- [22] S. Chang, Y. Kwon, S. Yang, I. Kim, *Speech Enhancement for non-stationnary noise environment by adaptive wavelet packet*. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '02), 2002, pp. 561-564.